

Cd 胁迫下马蔺根和叶中非蛋白巯基肽含量的变化

原海燕, 黄钢, 佟海英, 黄苏珍*

江苏省中国科学院植物研究所, 南京中山植物园, 江苏 南京 210014

摘要: 采用溶液培养, 研究了 Cd 胁迫以及 Cd 胁迫下添加外源谷胱甘肽 (GSH) 和丁胱亚磺酰胺 (BSO) 对马蔺 (*Iris lactea* var. *chinensis*) 根和叶干质量、Cd 含量以及非蛋白巯基总肽 (NPT)、谷胱甘肽 (GSH) 和其他非蛋白巯基化合物〔植物螯合肽 (PC)、半胱氨酸 (Cys) 等〕含量的影响。结果表明: 80 mg·L⁻¹ 高质量浓度 Cd 胁迫下马蔺根系内 Cd 的大量积累显著抑制马蔺根系的生长, 但相同 Cd 胁迫下添加 100 mg·L⁻¹ GSH (PC 合成底物) 和 BSO (PC 合成抑制剂) 后马蔺地上部 Cd 含量和根系干质量不同程度增加。根和叶中非蛋白巯基肽含量检测显示, 与单独 Cd 胁迫相比, Cd 胁迫下添加 GSH 和 BSO 对马蔺植物体内 NPT 总量基本无明显影响, 而是对 NPT、GSH 和其他非蛋白巯基化合物在地上部和根系的分配产生一定影响, Cd 胁迫下添加 GSH 后马蔺地上部 NPT 含量增加, 而 Cd 胁迫下添加 BSO 后使得马蔺根系 NPT 含量增加。其中添加外源 GSH 促进了马蔺地上部 GSH 合成, 使地上部 GSH 含量增加 13.1%, 其他非蛋白巯基化合物含量也增加; 而添加 BSO 抑制马蔺地上部 GSH 合成, 使地上部 GSH 含量降低 7.1%, 其他非蛋白巯基化合物含量也减少。但 Cd 胁迫下添加 GSH 和 BSO 后马蔺根系 GSH 含量均显著增加, 且绝大部分 GSH 分布于马蔺的根系组织, 尤其 Cd 溶液中添加 BSO 后马蔺根系 GSH 含量约是地上部 GSH 含量的 3.4 倍, 而 Cd 胁迫下添加 BSO 使马蔺地上部和根系其它非蛋白巯基化合物含量均出现不同程度下降。综合分析 Cd 胁迫下添加外源 GSH 和 BSO 后马蔺干质量、Cd 含量以及不同非蛋白巯基肽含量的变化及关系表明 Cd 胁迫下 GSH 较 PC 在马蔺 Cd 解毒和转运中具有更重要的作用。

关键词: Cd 胁迫; 马蔺; 非蛋白巯基; 谷胱甘肽; 植物螯合肽

中图分类号: X171.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2013) 07-1214-06

引用格式: 原海燕, 黄钢, 佟海英, 黄苏珍. Cd 胁迫下马蔺根和叶中非蛋白巯基肽含量的变化[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1214-1219.

YUAN Haiyan, HUANG Gang, TONG Haiying, HUANG Suzhen. The change of non-protein thiol content in roots and leaves of *Iris lactea* var. *chinensis* under Cd stress [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1214-1219.

近年来, 随着工农业的迅速发展及废弃物的长期排放, 使大量重金属镉 (Cd) 进入水体、土壤和植物生态系统, 导致环境中 Cd 污染日趋严重^[1]。Cd 毒害阻碍植物根系生长, 抑制养分的吸收, 引起一系列生理代谢紊乱, 并最终导致植物产量减少, 同时通过食物链危害人类健康。国内外已开展大量关于植物 Cd 毒害方面的研究, 其中, 巯基肽谷胱甘肽 (GSH)、植物螯合肽 (PC) 和半胱氨酸 (Cys) 等是 Cd 诱导植物体内产生的一类多肽, 对 Cd 离子的螯合能力很强, 在 Cd 累积和解毒过程中发挥重要作用^[2-4]。有研究报道 GSH 和 Cys 在植物对 Cd 的耐性和解毒方面起重要作用^[5-6]。PC 是一类广泛存在于植物体内富含谷氨酸、半胱氨酸和甘氨酸的巯基多肽, 通式为 $(\gamma\text{-Glu-Cys})_n\text{-Gly}$ ($n=2\sim 11$), 大量实验证据表明 Cd 与细胞质内 PC 相结合形成低分子量复合物, 然后经液泡膜上的转运蛋白运输至

液泡, 进而形成对植物毒性很低的富含硫的高分子量复合物贮存于液泡是植物对 Cd 的主要解毒机制^[7]。但也有一些研究报道认为, PC 在植物 Cd 的解毒和运输中不起主要作用^[8-9]。因此, 对于不同的植物种类, 这些巯基化合物所起的作用可能不同, 仍需要进一步研究。

马蔺 (*Iris lactea* var. *chinensis*) 为鸢尾科鸢尾属多年生宿根草本观赏植物, 广泛分布于我国的西北、东北、华北等地, 对重金属 Cd 表现出较强的富集能力^[10]。但非蛋白巯基肽是否影响马蔺对 Cd 的吸收以及是否承担马蔺对 Cd 的解毒作用尚不清楚。因此, 本文通过研究 Cd 胁迫以及 Cd 胁迫下添加外源 GSH (谷胱甘肽, PC 合成底物) 和 BSO (丁胱亚磺酰胺, PC 合成抑制剂) 对马蔺根和叶干质量、Cd 质量分数以及非蛋白巯基总肽 (NPT)、谷胱甘肽 (GSH) 和其它非蛋白巯基化合物〔植物

基金项目: 江苏省自然基金项目 (BK2010477)

作者简介: 原海燕 (1979 年生), 女, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事重金属污染植物修复研究。E-mail: yuanhaiyan416@163.com

*通信作者: 黄苏珍 (1959 年生), 女, 研究员, 主要从事观赏植物种质资源抗逆性评价及研究利用。E-mail: Hsz1959@163.com

收稿日期: 2013-01-28

螯合肽 (PC)、半胱氨酸 (Cys) 等] 质量分数的影响, 以探讨非蛋白巯基肽介导马蔺耐受 Cd 胁迫的能力以及耐受的可能机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为马蔺 (*I. lactea* var. *chinensis*), 植物材料栽培于江苏省中国科学院植物研究所鸢尾种质圃, 种子均为无性繁殖群体自然结实的当年种子。

1.2 试验方法

马蔺种子用 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaClO 消毒 20 min, 自来水冲洗数次后浸种催芽, 种子萌发后播于干净的石英砂中, 待幼苗长至高度约 15 cm 时选择整齐一致的幼苗置于 1 000 mL 的培养瓶中用 1/2 hoagland 营养液培养, 幼苗用 1 cm 厚的泡沫板和海绵固定, 培养瓶外面用黑色塑料薄膜包裹, 室温自然光照培养, 每 4 d 换 1 次营养液。预培养 2 周后添加 Cd 以及 GSH 和 BSO, Cd 以 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 形式添加, 质量浓度为 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, GSH 和 BSO 添加质量浓度均为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 共 4 个处理, 分别为 CK (Cd 0)、T1 (Cd 80)、T2 (Cd 80+100 GSH)、T3 (Cd 80+100 BSO), 每处理 3 次重复, 处理 1 个月后收获测定。

1.3 分析测定项目

1.3.1 生物量的测定

将幼苗从营养液中取出, 根系先用蒸馏水冲洗, 然后在 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙二胺四乙酸二钠 ($\text{EDTA}\cdot\text{Na}_2$) 溶液中交换 30 min, 以去除根系表面粘附的金属离子, 再用去离子水冲洗干净, 吸水纸吸干表面水分, 将叶片和根系分开, $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 2 h, 然后在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒质量后称量。

1.3.2 植物 Cd 质量分数测定

将烘干至恒质量的马蔺地上部和根系用玛瑙研钵磨碎后充分混匀, 用 $V(\text{HNO}_3) : V(\text{HClO}_4) = 87 : 13$ 混合液消煮提取, 消化至近干加硝酸溶解, 用体积分数为 5% 的硝酸定容至 20 mL, 用 ICP-AES (Perkin Elmer 3300) 测定 Cd 质量分数。

1.3.3 非蛋白巯基肽含量测定

NPT、GSH 和其它非蛋白巯基化合物 (PC、Cys 等) 含量测定: 称 0.2 g 植物样品, 加 2 mL 5% 磺基水杨酸 (SSA) 冰浴研磨, $12\ 000\times\text{g}$ 离心 15 min ($4 \text{ }^\circ\text{C}$), 上清液定容至 5 mL, 分装保存。

NPT 含量测定参照 Rama 和 Prasad^[11] 提出的方法, 反应体系为: 1 mL 上清液、1.85 mL $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl (pH 8.2)、0.15 mL $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 5,5'-双二硫 (2-硝基苯甲酸, DTNB), 反应 20 min 后用多功能酶标仪 (TECAN Infinite M200) 于 412 nm 处测定吸光值, 以不加 DTNB 为空白, 以 GSH 为 -SH 标样,

做标准曲线。

GSH 含量根据荧光法^[12]进行测定, 取 0.5 mL 上清液, 加入 1.5 mL PBS (pH 8.0, 含 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA), 用 NaOH 调节混合物至 pH 为 8.0; 取上述混合物 0.5 mL, 加入 1.4 mL $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PBS (pH 8.0) 和 100 μL OPT (0.1% 邻苯二甲醛), 室温反应 15~20 min, 用酶标仪 (TECAN Infinite M200) 测定样品荧光值, 激发波长为 350 nm, 发射波长为 420 nm。

其他非蛋白巯基化合物 (PC、Cys 等) 含量 = NPT - GSH, 即用差减法计算^[13]。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 11.5 统计分析软件进行数据分析及差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理下马蔺干质量变化

不同处理下马蔺根和叶干质量变化见图 1, 由图 1 可知, 与对照 (CK) 相比, $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下 (T1) 和添加 GSH 和 BSO 后 (T2、T3) 对马蔺地上部干质量无明显影响, 虽均较对照有所下降, 但差异不显著。而不同处理下马蔺根系干质量的变化与地上部不同, $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下马蔺根系干质量明显下降, 比对照降低 39.6%; 但相同 Cd 胁迫下添加 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ GSH 和 BSO 后马蔺根系干质量又逐渐回升, $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下添加 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ GSH 后 (T2) 马蔺根系干质量较对照下降 29.2%, 但比 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 单独 Cd 胁迫下马蔺根系干质量增加 17.1%; 而 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下添加 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BSO 后 (T3) 马蔺根系干质量较对照下降 9.1%, 但比 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 单独 Cd 胁迫下马蔺根系干质量增加 50.7%。

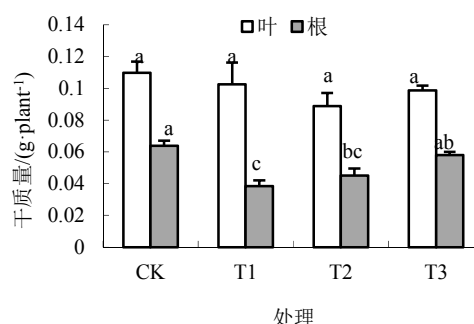


图 1 不同处理下马蔺根和叶干质量的变化

Fig.1 The changes in shoots and roots biomass of *Iris lactea* var. *chinensis* under different treatments

2.2 不同处理下马蔺 Cd 质量分数变化

不同处理下马蔺根和叶 Cd 质量分数变化见图 2, 由图 2 可知, $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 单一 Cd 胁迫下 (T1)

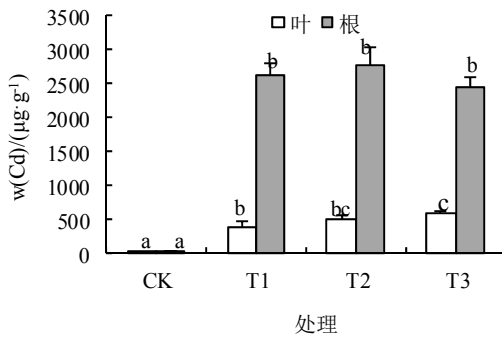


图2 不同处理下马蔺 Cd 质量分数的变化

Fig.2 The changes in Cd contents of *Iris lactea* var. *chinensis* under different treatments

以及 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下添加 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ GSH 和 BSO 后 (T2、T3) 马蔺根、叶 Cd 质量分数均较对照显著提高, 尤其根系。 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 单一胁迫下马蔺地上部和根系 Cd 质量分数分别为 386 、 $2618 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下添加 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ GSH 后 (T2), 马蔺地上部和根系 Cd 质量分数分别为 504 、 $2768 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 分别较 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 单一胁迫下马蔺地上部和根系 Cd 质量分数增加 30.5% 、 5.7% ; 而 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下添加 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BSO 后 (T3), 马蔺地上部和根系 Cd 质量分数分别为 590 、 $2446 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 地上部 Cd 质量分数较 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 单一胁迫下增加 52.8% , 但根系 Cd 质量分数较 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 单一胁迫降低 6.5% 。

2.3 不同处理下马蔺 NPT、GSH 和其他非蛋白巯基化合物含量的变化

2.3.1 NPT 含量

不同处理下马蔺根和叶 NPT 含量变化见图 3, 由图 3 可知, 不同处理下马蔺根系 NPT 含量均高于叶片 NPT 含量。无添加 Cd 处理下 (CK) 马蔺地上部和根系 NPT 质量分数分别为 1.15 、 $1.41 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 鲜质量, 地上部 NPT 含量是根系 NPT 含量的 81.8% 。 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 单一胁迫 (T1) 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd

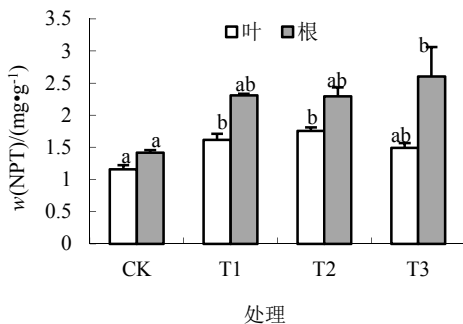


图3 不同处理下马蔺 NPT 含量的变化

Fig.3 The changes in NPT contents of *Iris lactea* var. *chinensis* under different treatments

胁迫下添加 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ GSH 和 BSO 后 (T2、T3) 马蔺地上部和根系 NPT 含量均表现出增加的趋势, 地上部 NPT 含量与根系 NPT 含量比值依次为 69.9% 、 76.5% 和 57.4% , 可以看出, Cd 胁迫下添加 GSH 后对马蔺植物体内 NPT 总量无明显影响, 但对 NPT 在地上部和根系的分配产生一定影响, 使得马蔺地上部 NPT 含量增加; 而 Cd 胁迫下添加 BSO 后对马蔺植物体内 NPT 总量也无明显影响, 但与添加 GSH 不同的是添加 BSO 使得马蔺根系 NPT 含量增加。

2.3.2 GSH 含量

不同处理下马蔺根和叶 GSH 含量变化见图 4, 由图 4 可知, CK ~ T3 处理下马蔺地上部 GSH 含量呈先增后降的趋势, 培养溶液中添加 Cd 后 (T1) 马蔺地上部 GSH 含量虽轻微增加但与对照相比变化不大。Cd 胁迫下添加 GSH 和 BSO 对马蔺地上部 GSH 含量的影响不同, 与单一 Cd 胁迫相比, 添加外源 GSH (T2) 促进了马蔺地上部 GSH 合成, 使地上部 GSH 含量增加 13.1% , 而添加 BSO (T3) 抑制马蔺地上部 GSH 合成, 使地上部 GSH 含量降低 7.1% 。不同处理下马蔺根系 GSH 含量变化不同于地上部, 与对照相比, Cd 单一胁迫和 Cd 胁迫下添加 GSH 和 BSO 后马蔺根系 GSH 含量均显著增加, 且绝大部分 GSH 分布于马蔺的根系组织, 尤其 Cd 溶液中添加 BSO 后马蔺根系 GSH 含量约是地上部 GSH 含量的 3.4 倍。

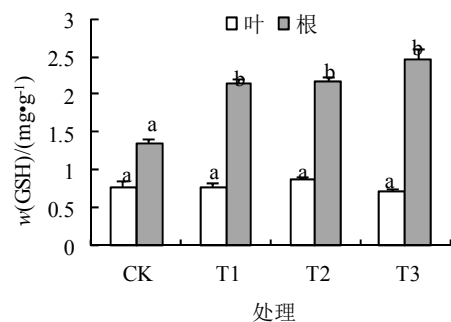


图4 不同处理下马蔺 GSH 含量的变化

Fig.4 The changes in GSH contents of *Iris lactea* var. *chinensis* under different treatments

2.3.3 其它非蛋白巯基化合物含量

不同处理下马蔺地上部和根系其他非蛋白巯基化合物含量变化见图 5, 由图 5 可知, 马蔺植物体内其他非蛋白巯基化合物含量与 NPT 和 GSH 含量以及其在体内的分配不同, NPT 和 GSH 含量主要分布于马蔺根系 (图 3 和图 4), 而其他非蛋白巯基化合物含量主要分布于马蔺地上部。CK ~ T3 处理下马蔺根系其他非蛋白巯基化合物质量分数依次为 0.06 、 0.16 、 0.12 和 $0.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 鲜质量, Cd

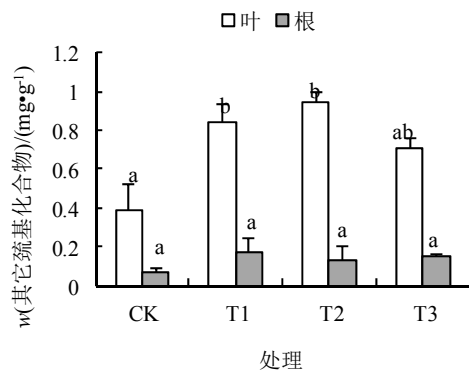


图5 不同处理下马蔺其他巯基化合物含量的变化

Fig.5 The changes in other non-protein thiol contents of *Iris lactea* var. *chinensis* under different treatments

胁迫 (T1) 和 Cd 胁迫下添加 GSH 和 BSO (T2、T3) 虽促进了马蔺根系其他非蛋白巯基化合物的合成, 但与对照相比差异不大。但 Cd 胁迫和 Cd 胁迫下添加 GSH 和 BSO 均明显增加了马蔺地上部其他非蛋白巯基化合物含量, CK ~ T3 处理下马蔺地上部其他非蛋白巯基化合物质量分数依次为 0.38、0.84、0.94 和 0.70 mg·g⁻¹ 鲜质量, Cd 胁迫下添加 GSH 增加了其他非蛋白巯基化合物在地上部的分配比例, 而 Cd 胁迫下添加 BSO 使马蔺地上部和根系其他非蛋白巯基化合物含量均出现不同程度下降。

3 讨论

Cd 是土壤中天然痕量元素, 但由于它在水中的高度溶解性和对植物的高度毒害性被认为是相对于其他重金属更具有危害性的重金属元素。Cd 很容易被许多植物的根系所吸收, 且大部分植物吸收的 Cd 主要积累在根部, 转移到地上部的只是一小部分, 本研究也得到类似结果, 马蔺吸收的 Cd 绝大部分积累在根系。植物体内蓄积大量的 Cd 势必会阻滞植物正常的生长发育, 造成作物减产和品质下降。生物量是衡量植物生长发育的重要指标。一般认为, 低浓度重金属处理对植物生长没有抑制作用, 但随着重金属浓度的增加, 对植物的抑制作用增强^[14]。我们前期研究也表明 10 mg·L⁻¹ 低质量浓度 Cd 处理具有促进马蔺生长的作用^[10]。本研究中, 80 mg·L⁻¹ 高 ρ (Cd) 处理下马蔺根系干质量明显下降, 与前人结果一致, 而地上部干质量未受明显影响, 这可能与马蔺体内大量 Cd 积累在根系有关。

硫 (S) 是动植物必需的营养元素, 无机 S 被植物吸收后, 可转化为多种含巯基 (-SH) 的化合物, 如半胱氨酸 (Cys)、谷胱甘肽 (GSH)、植物螯合肽 (PC)、金属硫蛋白 (Met) 和硫氧还蛋白等, 它们在植物对重金属的耐性中起着重要作用^[15-17]。由于 Cd 对 -SH 具有很强的亲和力, 巯基化合物在植

物对重金属忍耐和解毒中的作用受到广泛关注, 而大量研究表明与 Cd 解毒关系最密切的包括 Cys、GSH 和 PC 在内的非蛋白巯基 (NPT) 物质^[18]。本研究中, Cd 单一胁迫下马蔺地上部和根系 NPT、GSH 和其它非蛋白巯基化合物含量 (PC、Cys) 均表现出增加的趋势, 表明 Cd 胁迫下马蔺可能通过大量合成非蛋白巯基化合物以降低 Cd 胁迫对其的毒害程度。另外, 通过添加外源 GSH 和 PC 合成抑制剂研究了 Cd 胁迫下马蔺体内不同部位非蛋白巯基化合物含量的差异, 结果表明, 与 Cd 单一胁迫相比, 添加外源 GSH 后马蔺根系和地上部 NPT、GSH 和其他非蛋白巯基化合物含量基本上均呈增加的趋势。GSH 普遍存在于植物体内, 可以多种方式参与抵抗重金属胁迫, 如 PC 合成的底物、重金属螯合剂、抗氧化剂等^[19-20], Cd 胁迫下添加外源 GSH 后马蔺体内不同非蛋白巯基化合物水平的提高可能是外源 GSH 增强植物对环境胁迫的内在响应^[21]。而添加 PC 合成抑制剂 BSO 后马蔺根系 NPT 和 GSH 含量增加, 但根系和地上部其他非蛋白巯基化合物含量均下降。大量研究表明, 植物或细胞用重金属处理后, PC 和 GSH 水平两者表现出相互消长的关系^[22]。本研究中, 是否 BSO 的添加确实抑制了其他非蛋白巯基化合物中 PC 的合成以及 Cd 胁迫下 GSH 和 PCs 合成与降解及其调控机制还有待进一步研究。

植物耐 Cd 胁迫机制的一个重要方面是巯基物质 (GSH、PC、Cys 等) 与进入细胞的 Cd 结合形成硫肽复合物, 通过一些转运蛋白, 将这些复合物转运到胞外, 或者将其储存在液泡等细胞器内, 以降低金属离子对植物的毒害作用。另外, 最近研究发现, 非蛋白巯基化合物在植物体内对重金属不仅具有重要的解毒作用, 而且还具有促进 Cd 从根系向地上部长距离运输的功能^[23-24]。本研究中, 与 Cd 单独胁迫相比, Cd 胁迫下添加 GSH 后马蔺地上部和根系 Cd 质量分数分别增加 30.5%、5.7%, 且根系干质量也增加 17.1%, 表明外源 GSH 的添加促进了 Cd 向马蔺地上部的转运, 减轻了 Cd 对根系的毒害; 而 Cd 胁迫下添加 BSO 后马蔺地上部 Cd 质量分数增加 52.8%, 但根系 Cd 质量分数降低 6.5%, 表明 BSO 的添加可能抑制了 PC 的合成, 降低了 PC 对 Cd 的络合能力, 而使一部分向地上部转运。由此推测, Cd 胁迫下马蔺体内 GSH 的诱导合成不仅起着缓解毒害的作用, 还可能具有促进马蔺向地上部转运 Cd 的功能, 而 PC 可能主要起着根系 Cd 络合解毒的作用。

4 结论

1) 80 mg·L⁻¹ 高质量浓度 Cd 胁迫下, 马蔺地上部生长基本未受影响, 而根系干质量显著下降, 这主要是由于大部分 Cd 积累在马蔺根系造成马蔺根

系毒害严重。

2) Cd胁迫提高了马蔺地上部和根系NPT、GSH和其他非蛋白巯基化合物含量,说明Cd胁迫下马蔺可能通过大量合成非蛋白巯基化合物以降低Cd胁迫对其的毒害程度。而Cd胁迫下添加外源GSH后马蔺体内不同非蛋白巯基化合物水平的提高可能是外源GSH增强植物对环境胁迫的内在响应。

3) Cd胁迫下添加GSH和BSO后马蔺地上部Cd含量和根系干质量较大程度的增加,表明外源GSH的添加不仅起着缓解毒害的作用,还可能具有促进马蔺向地上部转运Cd的功能,而PC可能主要起着根系Cd络合解毒的作用。

参考文献:

- [1] 黄益宗,朱永官. 森林生态系统镉污染研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 101-108.
- [2] 冯倩,台培东,付莎莎,等. 巯基化合物在万寿菊镉解毒中的作用[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1): 214-218.
- [3] 孙琴,王晓蓉,袁信芳,等. 有机酸存在下小麦体内Cd的生物毒性和植物络合素(PCs)合成的关系[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2804-2809.
- [4] 宋相帝,吕金印,邸丽俊,等. 铬胁迫对青菜(*Brassica chinensis* L.)含量及植物螯合肽含量及抗氧化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 843-848.
- [5] SUN Q, YE Z H, WANG X R, et al. Increase of glutathione in mine population of *Sedum alfredii*: A Zn hyperaccumulator and Pb accumulator[J]. *Phytochemistry*, 2005, 66(21): 2549-2556.
- [6] DOMINGUEZ-SOILS J R, LOPEZ-MARTIN M C, AGER F J, et al. Increased cysteine availability is essential for cadmium tolerance and accumulation in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2004, 2(6): 469-476.
- [7] CLEMENS S. Toxic metal accumulation responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants[J]. *Biochimie*, 2006, 88(11): 1707-1719.
- [8] NISHIKAWA K, ONODERA A, TOMINAGA N. Phytochelatin do not correlate with the level of Cd accumulation in *Chlamydomonas* spp[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(9): 1553-1559.
- [9] ZHANG Z C, GAO X, QIU B S. Detection of phytochelatin in the hyperaccumulator *Sedum alfredii* exposed to cadmium and lead[J]. *Phytochemistry*, 2008, 69(4): 911-918.
- [10] HAN Y L, YUAN H Y, HUANG S Z, et al. Cadmium Tolerance and Accumulation by Two Species of *Iris* L [J]. *Ecotoxicology*, 2007, 16(8): 557-563.
- [11] RAMA D S, PRASAD M N V. Copper toxicity in *Ceratophyllum demersum* L. (Coontail), a free floating macrophyte: Response of antioxidant enzymes and antioxidants[J]. *Plant Science*, 1998, 138(2): 157-165.
- [12] HISSIN P J, HLF R. A fluorometric method for determination of oxidized and reduced glutathione in tissues[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 74(1): 214-226.
- [13] BHARGAVA P, SRIVASTAVA A K, URMIL S, et al. Phytochelatin plays a role in UV-B tolerance in N₂-fixing cyanobacterium *Anabaena doliolum*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162: 1220-1225.
- [14] 于方明,仇荣亮,胡鹏杰,等. Cd对小白菜抗氧化酶系统的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 950-954.
- [15] SAITO K. Regulation of sulfate transport and synthesis of sulfur-containing amino acids[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2000, 3(3): 188-195.
- [16] HELL R. Molecular physiology of plant sulfur metabolism[J]. *Planta*, 1997, 202(2): 138-148.
- [17] COBBRTT C T. Phytochelatin and their roles in heavy metal detoxification[J]. *Plant Physiology*, 2000, 123(3): 825-832.
- [18] 高可辉,葛滢,张春华. 缺硫对镉胁迫下水稻幼苗非蛋白巯基物质含量和谷胱甘肽硫转移酶活性的影响[J]. 2011, 22(7): 1796-1802.
- [19] 陈坤明,宫海军,王锁民. 植物谷胱甘肽代谢与环境胁迫[J]. 西北植物学报, 2004, 24(6): 1119-1130.
- [20] 晁岳愚,张敏,卢玲丽,等. 谷胱甘肽在东南景天Zn/Cd超积累过程中的作用[J]. 浙江大学学报, 2007, 33(6): 597-601.
- [21] ALSCHER R G. Biosynthesis and antioxidant function of glutathione in plants[J]. *Physiologia Plantarum*, 1989, 77(3): 457-464.
- [22] 孙琴,王超. 土壤外源Cd和Pb复合污染对小麦(*Triticum aestivum* L.)根系植物络合素和谷胱甘肽合成的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1833-1838.
- [23] COUSELO J L, NAVARRO-AVINO J, BALLESTER A. Expression of the phytochelatin synthase TaPCS1 in transgenic aspen, insight into the problems and qualities in phytoremediation of Pb[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2010, 12(4): 358-370.
- [24] WEI Z G, WONG J W C, ZHAO H Y, et al. Separation and Determination of Heavy Metals Associated with Low Molecular Weight Chelators in Xylem Saps of Indian Mustard (*Brassica juncea*) by Size Exclusion Chromatography and Atomic Absorption Spectrometry[J]. *Biological Trace Element Research*, 2007, 118(2): 146-158.

The change of non-protein thiol content in roots and leaves of *Iris lactea* var. *chinensis* under Cd stress

YUAN Haiyan, HUANG Gang, Tong Haiying, HUANG Suzhen*

Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Science (Nanjing Sun Yat-san Botanical Garden), Nanjing 210014, China

Abstract: The effects of cadmium (Cd) stress and exogenous GSH (Glutathione) and BSO [L-buthione (S, R) sulfoximine] application on dry biomass, Cd content and the contents of NPT (total non-protein thiol), GSH and other non-protein thiol [PC (phytochelatin), Cys (cystic), etc.] in roots and leaves of *Iris lactea* var. *chinensis* were studied by hydroponic culture method. The results showed that the massive accumulation of Cd significantly inhibited the growth of root in *Iris lactea* var. *chinensis*, but

aboveground Cd content and dry biomass of root of *Iris lactea* var. *chinensis* increased in degrees when adding $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ GSH (PC synthetic substrate) and BSO (PC synthesis inhibitor) to the same Cd solution. The detection results of non-protein thiol peptide content in roots and leaves showed that the GSH and BSO application had no significant impact on NPT content in *Iris lactea* var. *chinensis* under Cd stress, but a certain impact on the distribution of NPT, GSH and other non-protein thiol compounds in shoots and roots. The NPT content in the shoot of *Iris lactea* var. *chinensis* increased under adding GSH in Cd solution, while NPT content in the root increased when adding BSO to Cd solution. The exogenous GSH application promoted the synthesis of GSH and increased by 13.1% in shoot of *Iris lactea* var. *chinensis*, also increased the contents of other non-protein thiol compounds. However, exogenous BSO application inhibited the synthesis of GSH and decreased by 7.1%, also decreased the contents of other non-protein thiol compounds. The GSH contents in roots increased significantly and mainly located in root of *Iris lactea* var. *chinensis* when GSH and BSO application to the Cd solution. Furthermore, the root GSH contents were about 3.4 times higher than which in the shoot of *Iris lactea* var. *chinensis* when adding $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BSO in Cd solution, but the contents of other non-protein thiol compounds in shoots and roots decreased in the same time. Therefore, through a comprehensive analysis on the changes and relationship among dry biomass, Cd content, and non-protein sulfhydryl peptides contents in the shoot and root of *Iris lactea* var. *chinensis* under Cd stress and/or exogenous GSH and BSO application to Cd solution, it is concluded that GSH had a more important role in Cd detoxification and transporter than PC in *Iris lactea* var. *chinensis* under Cd stress.

Key words: Cd stress; *Iris lactea* var. *chinensis*; non-protein thiol; glutathione; phytochelatin